

Научная статья  
Статья в открытом доступе  
УДК 62-835  
doi: 10.30987/2782-5957-2024-8-21-30

## РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО КОЛЕСНОГО РОБОТА ДЛЯ ДОСТАВКИ ПОСЫЛОК

Евгений Николаевич Политов<sup>1</sup>, Александр Николаевич Рукавицын<sup>2✉</sup>, Лай Юньхай<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

<sup>1</sup> politovyevgeny@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0597-8505>

<sup>2</sup> alruk75@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2020-0814>

<sup>3</sup> laiyunhai594@gmail.com

### Аннотация

Целью исследования является разработка подходов к проектированию мобильного колесного робота для транспортировки малогабаритных грузов, работающего автономно без участия человека-оператора. При этом основной задачей стала разработка математической модели колесного робота, учитывающая моменты трения качения и скольжения ведущих колес по опорной поверхности, и которая позволила исследовать пусковые режимы работы электромеханического привода мобильного устройства. Повышение быстродействия мобильного робота достигается за счет минимизации времени разгона до требуемых значений скоростей за счет применения 2-х этапного алгоритма изменения управляющего напряжения. Разработка математической модели робототехнической системы осуществлялась на основе методов аналитической механики и теории автоматического управления. Используя преобразования Лапласа было получено аналитическое решение дифференциальных уравнений, описывающих динамику мобильного робота. Численное решение полученных уравнения

осуществлялось в среде *Mathcad*. Новизна работы заключается в получении временных зависимостей для скорости и тока в цепи электродвигателя колесного привода мобильного робота и установлении основных закономерностей движения в момент его запуска. Результаты проведенного исследования могут быть использованы при разработке систем управления движением мобильных роботов с обратной связью, обеспечивающих стабилизацию заданного значения скорости движения на установленных режимах

Выводы: разработана математическая модель мобильной робототехнической системы, исследованы пусковые режимы ее работы, исследован метод комбинированного управления движением и осуществлено повышение быстродействия мобильного колесного устройства при перемещении по заданной траектории движения.

**Ключевые слова:** мобильный робот, транспортировка, груз, управление, движение, математическое моделирование, напряжение, скорость.

Ссылка для цитирования:

Политов Е.Н. Разработка мобильного колесного робота для доставки посылок / Е.Н. Политов, А.Н. Рукавицын, Лай Юньхай // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 8. – С. 21-30. doi: 10.30987/2782-5957-2024-8-21-30.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет 2030».

Original article  
Open Access Article

## DEVELOPMENT OF A MOBILE WHEELED ROBOT FOR PARCEL DELIVERY

Evgeny Nikolaevich Politov<sup>1</sup>, Aleksandr Nikolaevich Rukavitsyn<sup>2✉</sup>, Lai Yunhai<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Southwest State University, Kursk, Russia

<sup>1</sup> politovyevgeny@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0597-8505>

<sup>2</sup> alruk75@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2020-0814>

<sup>3</sup> laiyunhai594@gmail.com

© Политов Е. Н., Рукавицын А. Н., Юньхай Лай, 2024

## Abstract

The study objective is to develop approaches to the design of a mobile wheeled robot for transporting small-sized goods, operating autonomously without the participation of a human operator. At the same time, the main task is to develop a mathematical model of a wheeled robot that takes into account the moments of rolling friction and sliding of the driving wheels on the support surface, and which allows to study the starting operation modes of the electromechanical drive of a mobile device. The increase in the speed of the mobile robot is achieved by minimizing the acceleration time to the required speed values through the use of a 2-stage algorithm for changing the control voltage. The development of a mathematical model of a robotic system is carried out on the basis of methods of analytical mechanics and the theory of automatic control. Using the Laplace transforms, an analytical solution of differential equations describing the dynamics of a mobile

robot is obtained. Numerical solution of the obtained equations is carried out in *Mathcad* interface. The novelty of the work consists in obtaining time dependencies for the speed and current in the circuit of the electric motor of the mobile robot wheeled drive and finding out the basic patterns of movement at its launch. The results of the conducted research can be used in the development of motion control systems for mobile robots with feedback, ensuring the stabilization of a set value of the movement speed in steady-state modes.

Conclusions: a mathematical model of a mobile robotic system is developed, the starting modes of its operation and the method of combined motion control are studied, the speed of a mobile wheeled device is increased when moving along a given trajectory.

**Keywords:** mobile robot, transportation, cargo, control, movement, mathematical modeling, voltage, speed.

## Reference for citing:

Polotov EN, Rukavitsyn AN, Yunhai L. Development of a mobile wheeled robot for parcel delivery. *Transport Engineering*. 2024;8:21-30. doi: 10.30987/2782-5957-2024-8-21-30.

**Funding:** This paper is funded in the context of the project Priority 2030 of the development program of the Southwest State University.

## Введение

Для доставки малогабаритных грузов из одного пункта в другой, все чаще находят применение мобильные автономные роботизированные системы, которые позволяют транспортировать небольшие, как по массе, так и объему, предметы. Такие устройства (мобильные роботы) могут быть полностью автономными, т. е. работать без участия человека или же управляться дистанционно. В сравнении с традиционными методами использование автономных мобильных роботов создает ряд преимуществ перед традиционными методами доставки небольших посылок. Во-первых, они могут работать круглосуточно, не требуют перерывов на отдых и не подвержены усталости. Во-вторых, они способны перемещаться по сложным маршрутам и преодолевать препятствия, которые могут быть недоступны для человека [1].

Движение мобильного робота в сложных условиях обеспечивается при совместном взаимодействии сложных кинематических схем и применяемых систем управления, измерения и очувствления. В зависимости от поставленной навигационной задачи для определения

положения робота в пространстве, а также необходимой коррекции его перемещения, применяются различные сенсорные системы, которые обеспечивают адекватную реакцию в соответствии с изменяющимися условиями окружающей среды робота [2].

Следует отметить, что использование автономных роботов для доставки посылок имеет также и свои недостатки:

- создание полностью автономных роботов требует значительных инвестиций в их разработку и производство;
- роботы могут быть подвержены сбоям и поломкам, что может привести к потере груза;
- некоторые клиенты могут испытывать страх или недоверие к роботам, что может негативно сказаться на их отношении к доставке товаров с помощью роботов.

При всех сложностях, с которыми сталкиваются разработчики автономных транспортных систем, повышение скорости движения мобильного колесного робота может быть достигнуто при минимизации времени разгона до требуемых значений скоростей, исходя из некоторых

начальных условий. Данная процедура позволяет обеспечить максимально

быстрое перемещение мобильного робота при движении по заданной траектории.

### Материалы, модели, эксперименты и методы

Решаемые задачи управления движением колесного робота определяют выбор его кинематической схемы и применяемой сенсорики. Главную роль в решении задачи построения конструкции робота выполняет выбранная стратегия управления, которая должна обеспечивать его движения с

учетом целого ряда динамических параметров устройства, а также особенностей применяемой системы измерений [3, 4].

Разрабатываемая конструкция автономного мобильного шестиколесного робота представлена на рис. 1.

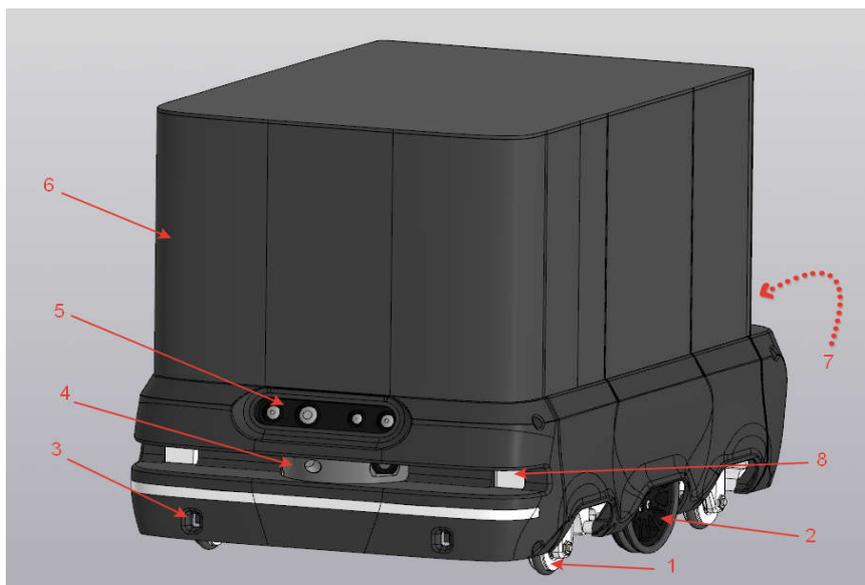


Рис. 1 Мобильный колёсный робот для доставки посылок: 1 – опорные колёса; 2 – ведущие колёса; 3 – датчик препятствий; 4 – лидар; 5 – блок камер и инфракрасных датчиков; 6 – грузовой контейнер; 7 – система автоматического управления; 8 – фары

*Fig. 1 Mobile wheeled robot for parcel delivery: 1 – support wheels; 2 – swivel wheels; 3 – obstacle sensor; 4 – lidar; 5 – a block of cameras and infrared sensors; 6 – a cargo container; 7 – an automatic control system; 8 – headlights*

Разработка математической модели колесного робота осуществлялась с учетом следующих допущений и упрощений:

– все конструктивные элементы колесного робота представляют собой абсолютно твердые тела;

– при взаимодействии ведущих колес с опорной шероховатой поверхностью возникают сила нормальной реакции, сила трения, а также момент трения качения;

– проскальзывание колес шасси отсутствует;

– потери механической мощности в конструктивных элементах малы и не учитываются;

– массой опорных колес пренебрегаем;

– центр масс робота находился в геометрическом центре всей его конструкции.

Считаем, что конструкция мобильного колесного симметрична (рис. 2) и весь его вес сосредоточен в точке  $O_2$ , которая находится над геометрическим центром колеса 1 – точкой  $O_1$ , которая является точкой приложения веса данного колеса. Нормальная реакция действует также на опорные колеса. При этом предполагается, что робот перемещается только в вертикальной плоскости  $Oxy$  и, следовательно, его координата  $z = 0$ .

На рис. 2 представлена расчетная схема мобильного колесного робота. Перемещение робота происходит относительно неподвижной системы координат  $Oxyz$ . Робот включает в себя ведущее колесо 1, которое установлено на валу управ-

ляемого электропривода с двигателем постоянного тока. Электропривод неподвижно закреплен на корпусе 2, который удерживается от опрокидывания при помощи опорных колес 3.

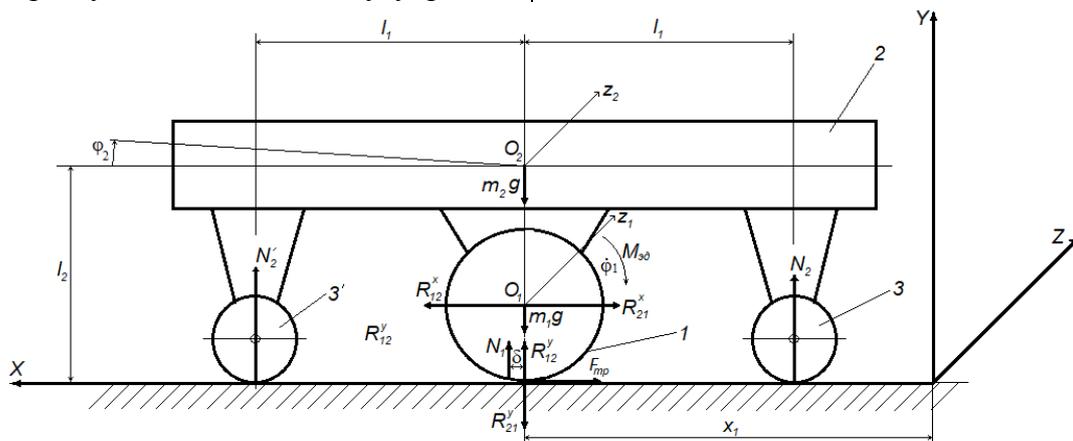


Рис. 2. Расчетная схема колесного робота  
Fig. 2. Calculation scheme of a wheeled robot

Кинетическую энергию рассматриваемой системы определим как

$$T = T_1 + T_2,$$

где  $T_1$ ,  $T_2$  – кинетические энергии колеса и корпуса робота.

Аналогично определяем потенциальную энергию системы

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2,$$

где  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  – потенциальные энергии корпуса и колеса соответственно.

Проведя соответствующие преобразования, запишем дифференциальные уравнения, которые будут описывать динамику робота с учетом свойств электропривода и момента трения качения ведущих колес без учета их проскальзывания [4]

$$\begin{cases} J\dot{\phi}_1 = M_{эд} - N_1\delta, \\ (m_1 + m_2)\ddot{x} = F_{мп}, \\ L\frac{di}{dt} + iR + c_\omega\dot{\phi}_1 = U(t) \end{cases} \quad (1)$$

Данные уравнения содержат момент электродвигателя  $M_{эд}$ , и неизвестную нормальную реакцию  $N_1$ .

Для исследования динамических параметров движения колесного робота требуется определить динамические реакции, которые будут действовать на под-

шипниковые узлы и вал электродвигателя колесного привода. Неизвестные реакции определим с помощью уравнений движения мобильного робота, составленных согласно принципу Даламбера, и которые позволяют также определить зависимость крутящего момента электродвигателя от тока [5, 6].

Рассмотрим движение ведущих колес корпуса робота совместно с опорными роляльными колесами и запишем соответствующие дифференциальные уравнения, которые позволят определить его динамические характеристики. Такая методика дает возможность определить динамические реакции, которые будут действовать на валы электропривода и подшипники колес. Учет этих реакций позволяет определить силу трения и момент трения качения, что особенно необходимо при использовании для управления движением робота форсированных пусковых режимов, которые характеризуются высокими уровнями ускорений и нормальных реакций.

Положение мобильного робота определяется обобщенными координатами  $x_2$ ,  $y_2$ ,  $\phi_2$ .

Движение колесного мобильного робота представим в виде системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} m_2 \ddot{x}_2 = R_{12}^x, \\ m_2 \ddot{y}_2 = -m_2 g + N_2 + R_{12}^y \\ J_{02} \ddot{\phi}_2 = M_{\omega} + \zeta(t) N_2 l_1 - R_{12}^x (l_3 - r) - R_{12}^y l_2 \end{cases} \quad (2)$$

где  $m_2$  - масса корпуса робота;  $m_1$  - масса ведущего колеса;  $J_{02}$  - момент инерции корпуса робота;  $R_{12}^x, R_{12}^y$  - проекции на оси  $x$  и  $y$  соответственно силы реакции со стороны колеса на корпус робота;  $N_2$  - сила нормальной реакции;  $M_{\omega}$  - момент электродвигателя колесного привода;  $l_1, l_2$  - линейные размеры робота;  $r$  - радиус колеса;

$$\zeta(t) = \begin{cases} 0, t > t_1 \\ 1, t < t_1 \end{cases}$$

где  $t_1$  - время отрыва от поверхности опорного колеса ( $N_2 = 0$ ).

Положение ведущего колеса определяют обобщенные координаты  $x_1, y_1, \phi_1$ . Учитывая свойства управляемого электрического привода подвижной платформы мобильного робота, дифференциальные уравнения описывающие движение ведущего колеса 2 запишем как

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} + iR + c_{\omega} \dot{\phi}_1 = U(t) \\ m_1 \ddot{x}_1 = R_{21}^x + F_{mp} \\ m_1 \ddot{y}_1 = -m_1 g + N_1 - R_{21}^y \\ J_{01} \ddot{\phi}_1 = M_{\omega} - N_1 \delta - F_{mp} r \end{cases} \quad (3)$$

где  $L$  - индуктивность якоря электродвигателя;  $R$  - активное сопротивление якоря электродвигателя;  $c_{\omega}$  - постоянная электродвигателя;  $m_1$  - масса колеса;  $\dot{\phi}$  - угловая скорость колеса;  $N_1$  - нормальная реакция со стороны опорной поверхности;  $F_{mp}$  - сила трения, действующая на колесо;  $R_{21}^x, R_{21}^y$  - реактивные силы;  $\delta$  - коэффициент трения качения.

Учитывая уравнения (2), предполагаем, что  $\dot{\phi}$  не равно нулю, получаем из системы (3)

$$\phi_1 = \frac{A\delta + ic_{1e}}{Jp^2} = \frac{A\delta}{Jp^2} + \frac{(U_1 - c_{\omega} p \phi_1) c_{1e}}{(Lp + R) Jp^2} = \frac{A\delta(Lp + R) + (U_1 - c_{\omega} p \phi_1) c_{1e}}{JLp^3 + RJp^2}$$

Выполняя преобразования

$$\phi_1 (Lp^3 + R) Jp^2 = A\delta(Lp + R) + U c_{1e} - c_{\omega} p \phi_1 c_{1e},$$

приведем подобные

$$\phi_1 (JLp^3 + RJp^2 + c_{\omega} p \phi_1 c_{1e}) = A\delta(Lp + R) + U c_{1e},$$

$$\phi_1 = \frac{A\delta(Lp + R)}{JLp^3 + RJp^2 + c_{\omega} p c_{1e}} + \frac{U c_{1e}}{JLp^3 + RJp^2 + c_{\omega} p c_{1e}}$$

$$J_{01} \ddot{\phi}_1 = M_{\omega} - N_1 \delta,$$

что соответствует уравнению движения рассматриваемой системы, которое было получено на основе уравнений Лагранжа.

Принимаем, что закон изменения момента электродвигателя зависит от тока якоря и имеет вид

$$M_{\omega} = M_{\omega}(i) + i \frac{\partial M_{\omega}}{\partial i} + i^3 \left( \frac{\partial M_{\omega}}{\partial i} \right)_3 + \dots \quad (4)$$

Ограничиваясь только вторым и третьим слагаемыми ряда, можем записать

$$M_{\omega} = i C_{1e},$$

где  $C_{1e}$  - постоянная, определяемая экспериментально.

Если считать, что опорная точка и колесо не отрываются от поверхности (т.е.  $N_1 > 0$  и  $N_2 > 0$ ), а проскальзывание ведущего колеса отсутствует, то уравнения связи имеют вид

$$\phi_1 r = x_1; y_1 = r; y_2 = l_2; \phi_2 = 0 \quad (5)$$

Запишем также равенства

$$R_{12}^x = R_{21}^x, R_{12}^y = R_{21}^y \quad (6)$$

Применяя преобразования Лапласа [7, 8], будем искать аналитическое решение дифференциальных уравнений, описывающих динамику мобильного робота. Для этого приведем полученную систему уравнений к виду

$$\begin{cases} J \phi_1 p^2 = A\delta + ic_{1e} \\ Lpi + iR + c_{\omega} p \phi_1 = U(p) \end{cases}$$

Из первого уравнения данной системы можно определить угол поворота колеса

$$\phi_1 = \frac{A\delta + ic_{1e}}{Jp^2} = \frac{A\delta}{Jp^2} + \frac{ic_{1e}}{Jp^2},$$

а из второго уравнения найдем ток

$$i = \frac{U_1 - c_{\omega} p \phi_1}{Lp + R}$$

Тогда

При отсутствии трения качения  $M_{тр} = 0$  (частный случай) упрощенное выражение, которое определяет угол поворота колеса, имеет вид

$$\varphi_1 = \frac{Uc_{1e}}{JLp^3 + RJp^2 + c_{\omega}pc_{1e}}.$$

Разделив числитель и знаменатель на  $c_{\omega}c_{1e}$  и введя обозначения:

$$k = \frac{1}{c_{\omega}}, T_2 = \frac{RJ}{c_{\omega}c_{1e}}, T_3 = \frac{JL}{c_{\omega}c_{1e}},$$

получим

$$\varphi_1 = \frac{Uk}{T_3p + T_2p^2 + p}.$$

Задача управления формулируется как необходимость изучения влияния параметров управляющего напряжения на движение робота [9,10]. Также происходит изучение изменения угловой скорости и тока в цепи якоря электромеханического привода ведущих колес при разгоне робота, т.е. изменения его скорости движения от нулевого значения до максимального.

### Результаты моделирования

Ниже представлены результаты моделирования основных параметров, характеризующих движение мобильного колесного робота в зависимости от времени. При этом в начале моделируется

обычный режим запуска робота при подаче на приводы постоянного управляющего напряжения от 10 до 30 В (рис. 3а) и закон изменения угловой скорости ведущего колеса (рис. 3б).

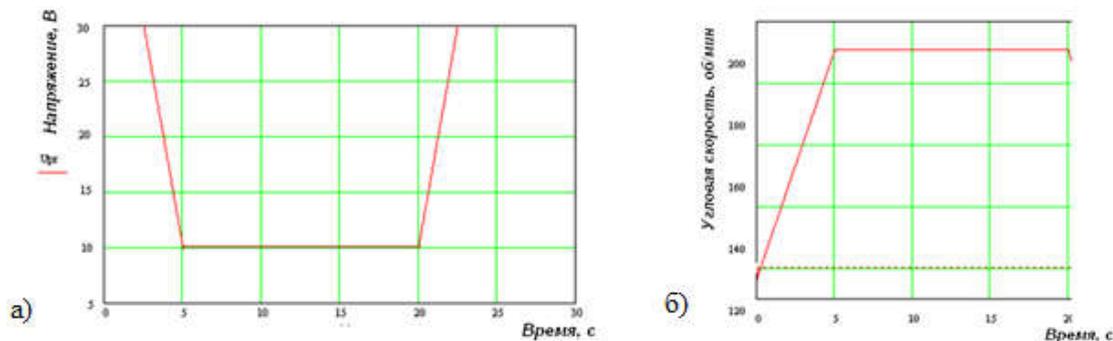


Рис. 3. Законы изменения управляющего напряжения (а) и угловой скорости колеса (б)

Fig. 3. The laws of change of the control voltage (a) and the angular velocity of the wheel (b)

На графике видно, что робот выходит на заданную угловую скорость ( $250 \text{ с}^{-1}$ ) за

5 с. При этом ток в цепи якоря не превышает 3 А (рис. 4).

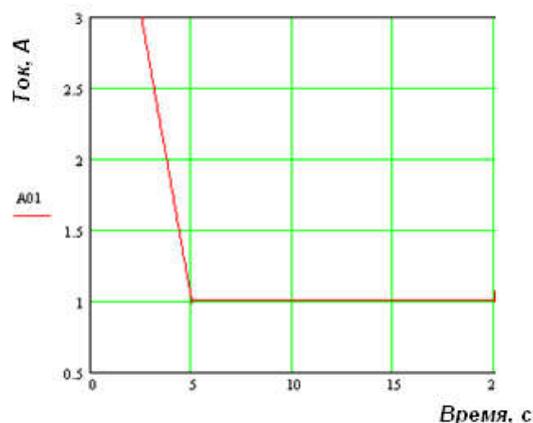


Рис. 4. График изменения тока в цепи якоря электродвигателя колесного привода  
Fig. 4. Graph of current changes in the armature circuit of a wheel drive electric motor

С целью уменьшения времени разгона мобильного робота был применен 2-х этапный алгоритм кусочно-постоянного напряжения, который

показан на рис. 5а. Временная зависимость угловой скорости колеса мобильного робота представлена на рис. 5б.

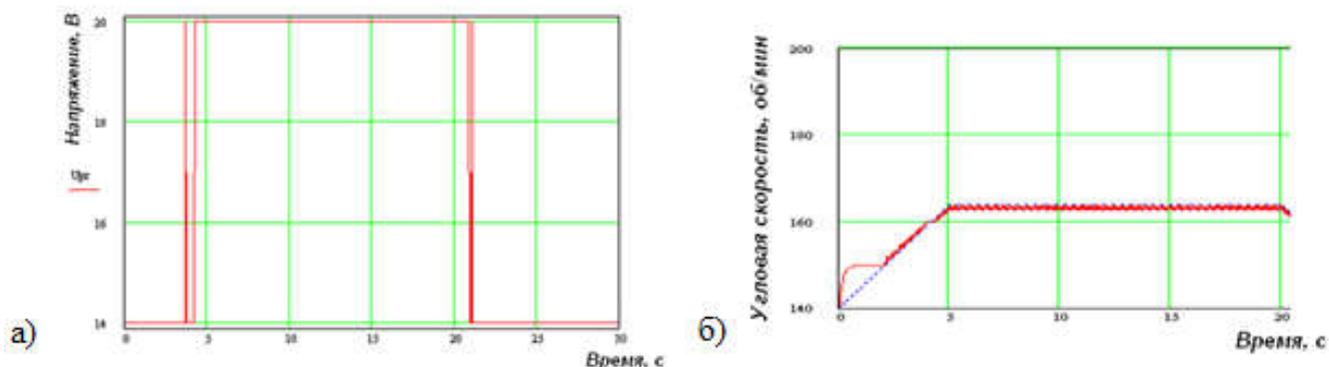


Рис. 5. 2-х этапный алгоритм питающего напряжения – а) и график изменения угловой скорости колеса – б)  
 Fig. 5. A 2-stage algorithm of the supply voltage – a) and a graph of the change in the angular velocity of the wheel – b)

Как видно на рис. 5, уровень управляющего напряжения на первом этапе 14 В. Данный уровень поддерживается в течение 4 с, а затем уже на втором этапе значение напряжения повышается до 20 В и поддерживается

также в течение 17 с. Далее напряжение питания снижается до 14 В и удерживается постоянным. При этом выход на рабочий режим происходит за время около 5 с, а пусковой ток достигает 13 А. (рис. 6).

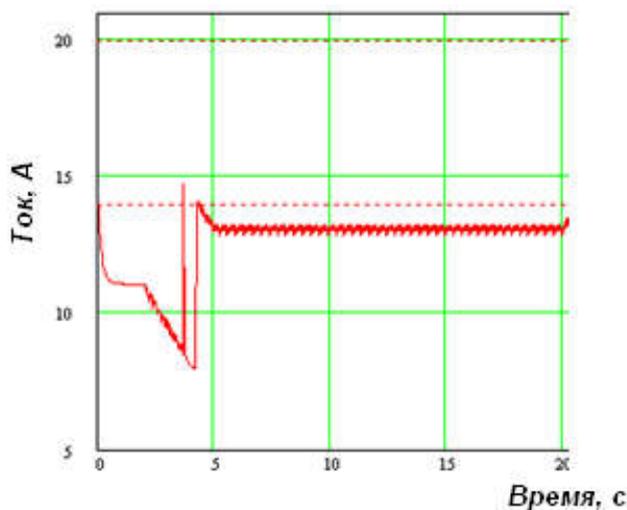


Рис. 6. График изменения тока в цепи якоря электродвигателя колесного привода  
 Fig. 6. Graph of current changes in the armature circuit of a wheel drive electric motor

Уменьшение значения пускового тока в соответствии с законом изменения управляющего напряжения, который показан на рис. 7а. В начале на обмотки якоря подается напряжение 15 В. Затем напряжение увеличивается до 20 В и удерживается в течение 15 с, после чего

снижается до уровня 14 В и остается постоянным. При этом закон изменения угловой скорости принимает вид, показанный на рис. 7б, где хорошо видно, что время пуска составляет 5 с, при уровне тока не превышающем 15 А (рис. 8).

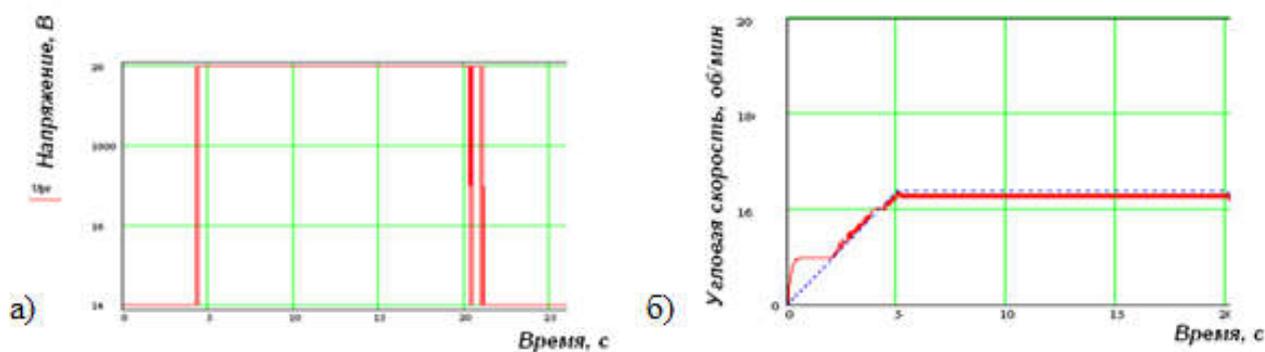


Рис. 7 Управляющее напряжение (а) закон изменения угловой скорости ведущего колеса (б)  
 Fig. 7 Control voltage (a) the law of change of angular velocity of the driving wheel (b)

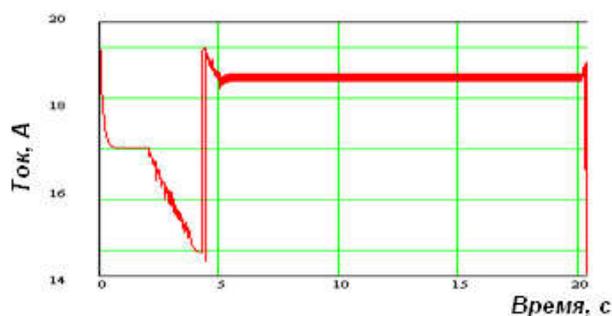


Рис. 8 Изменение тока в цепи якоря электродвигателя  
 Fig. 8 Current change in the motor armature circuit

Анализируя полученные данные можно сделать вывод, что форма управляющего напряжения оказывает существенное влияние на характер изменения угловой скорости ведущих колес, и как следствие изменение скорости всего мобильного колесного робота. В сравнении с запуском при постоянном напряжении, подбор рационального закона управления движением мобильного робота позволяет значительно снизить время запуска (примерно в 3,5 раза). Однако при этом наблюдается большой рост пикового значения пускового тока, который влечет

за собой более высокие требования к электродвигателю привода колесного робота. При использовании 2-х этапного алгоритма изменения управляющего напряжения установлено, что время пускового режима практически не зависит от принятой последовательности уровней напряжения питания колесного привода. Кроме того, полученные результаты однозначно указывают, что поддержание заданной скорости движения мобильного робота требует дополнения системы управления каналом обратной связи.

## Заключение

Математическое моделирование движения колесного робота позволяет исследовать пусковые режимы работы мобильного устройства, включающие в себя условия пуска на основе учета момента трения качения и скольжения ведущих колес по опорной поверхности [11]. Повышение быстродействия мобильного колесного робота достигается за счет минимизации времени разгона до требуемых значений скоростей. Исследованный

метод комбинированного управления движением при запуске мобильного робота, базирующийся на использовании стабилизирующего и 2-х этапного алгоритмов изменения питающего напряжения, позволяет достигать хороший разгон мобильного робота, обеспечивая максимально быстрое его перемещение по заданной траектории движения.

Применяя нулевые начальные условия, были определены основные

закономерности движения мобильного робота в момент его запуска и получены временные зависимости для скорости и тока в цепи электродвигателя колесного привода. При этом установлено, что при наличии ограничений по току максимально быстрый разгон робота может быть обеспечен применением кусочно-постоянных режимов управления движением, которые характеризуются почти двухкратным величиной начального

напряжения на первоначальном этапе движения.

Проведенные исследования позволяют создать предпосылки для разработки системы автоматического управления движением мобильного колесного робота с реализацией обратной связи по угловой скорости вращения ведущих колес и стабилизацией заданного значения скорости движения всего робота в установившихся режимах.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яцун С.Ф., Чжо П.В., Рукавицын А.Н. Изучение движения мобильной колесной системы с кинематически связанными движителями. Прогресс транспортных средств и систем. 2018: материалы международной научно-практической конференции. 2018. С. 162.
2. Яцун С.Ф., Чжо П.В., Рукавицын А.Н. Перспективы разработки мобильных робототехнических систем с кинематическими связанными движителями. Тенденции развития науки и образования. 2018; С. 33-35.
3. Кампион Г., Бастен Ж., д'Андреа-Новель Б. Структурные свойства и классификация кинематических и динамических моделей колесных мобильных роботов. Нелинейная динамика. 2011 Т. 7 № 4 (Мобильные роботы). С. 733-769.
4. Павловский В.Е., Алисейчик А.П. Модель и динамические оценки управляемости и комфортабельности движения многоколесного мобильного робота. Журнал проблемы управления. 2013 № 1 С.70-78.
5. Сизых В.Н., Баканов М.В. Математическая модель для адаптивного управления трёхколёсным мобильным роботом. Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство: Материалы международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург: СПбФ НИЦ МС, 2018. № 1 С. 9-18.
6. Бартнев В.В., Яцун С.Ф. Аль Еззи А.С. Математическая модель движения мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами по горизонтальной плоскости. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011, №4 С (13).288-293
7. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления: М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 616 с.
8. Зенкевич С.Л., Назарова А.В. Система управления мобильного колесного робота. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2006. № 3 С.31-48.
9. Gronowicz A., Szrek J. Design of LegVan Wheel-Legged Robot's. Mechanical and Control System ( SYROM 2009). 2009 Pp. 145-158.
10. Krzysztof Kozlowski, Dariusz Pazderski. Modeling and control of fourwheeled skid-steering mobile robot. Math. Comput. Sci., 2004, Vol. 14, No. 4, 477-496
11. Евстигнеев М. И., Литвинов Ю. В., Мазулина В. В. и др. Алгоритмы управления роботом при движении по пересеченной местности. Изв. вузов. Приборостроение. 2015, № 9 (58) С. 738-741.

## REFERENCES

1. Yatsun SF, Zhuo PV, Rukavitsyn AN. Study of the movement of a mobile wheeled system with interlocked drivers. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 2018: Progress of Vehicles and Systems; 2018.
2. Yatsun SF, Zhuo PV, Rukavitsyn AN. Prospects for the development of mobile robotic systems with interlocked drivers. Trends in the development of science and education; 2018.
3. Campion G, Basten J, d'Andrea-Novell B. Structural properties and classification of mathematical and dynamic models of mobile wheeled robots. Nonlinear Dynamics. 2011;7(4):733-769.
4. Pavlovsky VE, Aliseychik AP. Model and dynamic estimates of controllability and comfort of movement of a multi-wheeled mobile robot. Control Sciences. 2013;1:70-78.
5. Sizykh VN, Bakanov MV. Mathematical model for adaptive control of a three-wheeled mobile robot. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 2018: Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production. St. Petersburg: SPbF SIC MS; 2018.
6. Bartenev VV, Yatsun SF, Al Yezzi AS. Mathematical model of the movement of a mobile robot with two independent driving wheels along a horizontal plane. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2011;4(13):288-293
7. Pupkov KA, Egupov ND. Methods of classical and modern theory of automatic control. Synthesis of

- regulators of automatic control systems. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University; 2004.
8. Zenkevich SL, Nazarova AV. Control system of a mobile wheeled robot. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering. 2006;3:31-48.
  9. Gronowicz A, Szrek J. Design of LegVan wheel-legged robot's. Mechanical and Control System ( SYROM 2009); 2009.

10. Krzysztof Kozlowski. Dariusz Pazderski. Modeling and control of fourwheeled skid-steering mobile robot. Math. Comput. Sci. 2004;14(4):477–496.
11. Evstigneev MI, Litvinov YuV, Mazulina VV. Algorithms for controlling the robot when driving over rough terrain. Izv. universities. Instrumentation. 2015;9(58):738-741.

#### **Информация об авторах:**

**Политов Евгений Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники ЮЗГУ: Scopus-Author ID 57194635674, Research- ID-Web of Science L-176177, Author-ID-РИНЦ 176177, тел.8(960)685-75-79.

**Рукавицын Александр Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механи-

**Politov Evgeny Nikolaevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics of Southwest State University; Scopus-Author ID 57194635674, Research-ID-Web of Science L-176177, Author-ID-RSCI 176177; phone: 8(960)685-75-79.

**Rukavitsyn Aleksandr Nikolaevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the De-

ки, мехатроники и робототехники ЮЗГУ: Scopus-Author ID 56910069200, Research- ID-Web of Science L-3380-2013, Author-ID-РИНЦ 423663, тел.8(951)316-97-93.

**Лай Юньхай** – студент естественнонаучного факультета ЮЗГУ, тел. 8(951)316-97-93.

partment of Mechanics, Mechatronics and Robotics of Southwest State University, Scopus-Author ID 56910069200, Research-ID-Web of Science L-3380-2013, Author-ID-RSCI 423663; phone: 8(951)316-97-93.

**Lai Yunhai** – Student of the Faculty of Natural Sciences of Southwest State University; phone: 8(951)316-97-93.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 13.06.2024; одобрена после рецензирования 14.06.2024; принята к публикации 26.07.2024. Рецензент – Хандожко В.А., кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированные технологические системы» Брянского государственного технического университета.**

**The article was submitted to the editorial office on 13.06.2024; approved after review on 14.06.2024; accepted for publication on 26.07.2024. The reviewer is Khandozhko V.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automated Technological Systems at Bryansk State Technical University.**